CAPÍTULO 4

NORMAS Y REGLAS HIDROLÓGICAS

4.1 Unidades y símbolos

Convendría normalizar las unidades y los símbolos utilizando las recomendaciones que figuran en las tablas 4.1 a 4.3 [1, 2]. Se mencionan también otras unidades y los factores de conversión comúnmente usados. Se ha hecho un esfuerzo para lograr que todos los símbolos y las unidades en esta Guía estén contemplados dentro de estas tablas.

4.2 Prácticas y procedimientos recomendados

La uniformidad y la normalización, cuando proceda, de las prácticas y los procedimientos hidrológicos facilitarán la cooperación entre los Miembros en esta materia. En los siguientes capítulos de la *Guía* se describen las prácticas y los procedimientos hidrológicos recomendados. No obstante, el lector debe referirse al Volumen III del *Reglamento Técnico* [31 para el texto relativo a las prácticas y los procedimientos recomendados en materia de hidrología operativo, aprobados por la OMM.

El Volumen I del *Reglamento Técnico* [41 contiene las prácticas y los procedimientos recomendados o normalizados. Las instrucciones detalladas relativas a los instrumentos y los métodos de observación se encuentran en la Parte B de esta *Guía,* así como en otros documentos de referencia de la OMM como la *Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación* [51 y la *Guía de prácticas climatológicas* [6]. Los métodos de recopilación y almacenamiento de datos hidrológicos, descritos en la Parte C de esta *Guía,* se deberán aplicar siempre que sea posible.

Para la comodidad del lector, a continuación se resumen las prácticas y los procedimientos generalmente recomendados. Se invita a los Miembros a que cumplan estas prácticas y procedimientos recomendados en el establecimiento de los servicios hidrológicos y en las actividades que realizan:

a) la red básica de estaciones hidrométricas debería estar concebida de manera que pueda suministrar los datos y la información indispensable para realizar una evaluación global de los recursos hídricos nacionales o regionales. En el capítulo 20 de esta *Guía* se indican las densidades mínimas recomendadas para la red. En vista de la estrecha relación que existe entre la meteorología y la hidrología, sería útil una buena coordinación entre las redes hidrométricas y climatológicas;

TABLA 4.1

Símbolos, unidades y factores de conversión recomendados

I	*II*	*III*	*IV*	*V*	*VI*	*VII*
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
1	Aceleración debida a la gravedad	*g*	m s-2	pie s-2	0,305	ISO
2	Albedo	*r*	Expresado en forma decimal			
3	Área de la sección transversal (cuenca de drenaje)	*A*	m2 km2	pie2 acre ha milla2	0,0929 0,00405 0,01 2,59	ISO ISO
4	Calidad química		mg l-1	ppm	~ 1	(Para soluciones diluidas)

Nota: Cuando existen símbolos internacionales, éstos se han utilizado en los casos adecuados y se indican con la expresión ISO en la última columna.

* Columna IV = Factor de conversión (Col.IV) x Col.V.

I	*II*	*III*	*IV*	*V*	*VI*	*VII*
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
5	Coeficiente de Chézy [$v\ (R_h S)^{-1/2}$]	*C*	$m^{1/2}\ s^{-1}$	$pie^{1/2}\ s^{-1}$	0,552	ISO
6	Conducción	*K*	$m^3\ s^{-1}$	$pie^3\ s^{-1}$	0,0283	ISO
7	Grado día	*D*	Grado día	Grado día	Fórmula de Conversión C = 5/9 (°F-32)	Col. IV en °C y Col. V en °F
8	Densidad	*p*	$kg\ m^{-3}$	$lb\ pie^{-3}$	16,0185	ISO
9	Profundidad, diámetro, espesor	*d*	m cm	pie pulgada	0,305 2,54	ISO
10	Caudal (de un río) (de un pozo) (área unitaria-$Q\ A^{-1}$, o parcial)	 Q Q_{we} q	 $m^3\ s^{-1}$ $l\ s^{-1}$ $m^3\ s^{-1}\ km^2$ $l\ s^{-1}\ km^{-2}$	 $pie^3\ s^{-1}$ $gal\ (U.S.)\ min^{-1}$ $pie^3\ s^{-1}\ milla^{-2}$	 0,0283 0,063 0,0109 10,9	 ISO ISO

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
11	Descenso del nivel	s	m cm	pie	0,305 30,5	
12	Viscosidad dinámica (absoluta)	η	N s m^{-2}			ISO Pa, s, kg m^{-1} s^{-1} también en uso
13	Evaporación	E	mm	pulgadas	25,4	
14	Evapotranspiración	E_T	mm	pulgadas	25,4	
15	Número de Froude	Fr	Número adimensional			ISO
16	Carga, altura	z	m	pie	0,305	ISO

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
17	Carga, presión	h_p	m	kg (fuerza) cm^{-2} lb (fuerza) $pulgada^{-2}$	10,00 0,705	
18	Carga estática (nivel de agua) $= z + h_p$	h h	cm m	pie	30,05 0,305	ISO
19	Carga total $= z + h_p + h_v$	H	m	pie	0,305	ISO
20	Carga cinética $= v^2 (2g)^{-1}$	h_v	cm m	pie	30,5 0,305	
21	Conductividad hidráulica (permeabilidad)	K	cm s^{-1}	m d^{-1} pie min^{-1}	0,00116 0,508	

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
22	Difusividad hidráulica = $T\ C_s^{-1}$	D	$cm^2\ s^{-1}$			
23	Radio hidráulico = $A\ P_w^{-1}$	R_h	m	pie	0,305	ISO
24	Espesor del hielo	d_g	cm	pulgada	2,54	
25	Infiltración	f	mm	pulgada	25,4	
26	Tasa de infiltración	I_f	$mm\ h^{-1}$	$pulgada\ h^{-1}$	25,4	
27	Permeabilidad intrínseca	k	$10^{-8}\ cm^2$	Darcy	0,987	
28	Viscosidad cinemática	ν	$m^2\ s^{-1}$	$pie^2\ s^{-1}$	0,0929	ISO

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
29	Longitud	l	cm m km	pulgada pie milla	2,54 0,305 1,609	ISO
30	Coeficiente de Manning = $R_h^{2/3}\ S^{1/2}\ v^{-1}$	n	$s\ m^{-1/3}$	$s\ pie^{-1/3}$	1,486	ISO $1/n = k$, coeficiente de rugosidad también puede utilizarse
31	Masa	m	kg g	lb oz	0,454 28,35	ISO
32	Porosidad	n	%			Se puede usar α si es necesario
33	Precipitación	P	mm	pulgada	25,4	

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
34	Intensidad de la precipitación	I_p	mm h^{-1}	pulgada h^{-1}	25,4	
35	Presión	p	Pa	hPa mm Hg pulgada Hg	100,0 133,3 3386,0	Véase también carga, piezométrica
36	Radiación** (cantidad de energía radiante por unidad de área)	R	J m^{-2}	ly	4,187 x 10^4	
37	Intensidad de radiación** (flujo por unidad de área)	I_R	J m^{-2} s^{-1}	ly min^{-1}	697,6	

** Términos generales. Para más detalles sobre la terminología y los símbolos, véase la *Guía de instrumentos y métodos de observación hidrológicos*, (OMM-N°8) (5).

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
38	Radio de influencia	r_2	m	pie	0,305	
39	Coeficiente de recesión	C_r	Expresado en forma decimal			
40	Humedad relativa	U	%			
41	Número de Reynolds	R_e	Número adimensional			ISO
42	Escorrentía	R	mm	pulgada	25,4	
43	Concentración de sedimentos	c_s	kg m^{-3}	ppm	Depende de la densidad	
44	Caudal de sedimentos	Q_s	t d^{-1}	ton (EE.UU.) d^{-1}	0,907	
45	Tensión de corte	τ	Pa			ISO

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
46	Pendiente (hidráulica, cuenca)	S	Número adimensional			ISO
47	Capa de nieve	A_n	%			
48	Profundidad de la nieve	d_n	cm	pulgada	2,54	
49	Fusión de la nieve	M	mm	pulgada	25,4	Normalmente expresado como medida diaria
50	Humedad del suelo	U_s	% volumen	% masa	Depende de la densidad	
51	Deficiencia de humedad del suelo	U_s'	mm	pulgada	25,4	

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
52	Capacidad específica = $Q_{we}\ s^{-1}$	C_s	$m^2\ s^{-1}$	$pie^2\ s^{-1}$	0,0929	
53	Conductancia específica	K	$\mu S\ cm^{-1}$			a 0 – 25°C
54	Rendimiento específico	Y_s	Expresado en decimales			
55	Almacenamiento	S	m^3	pie^3	0,0283	
56	Coeficiente de almacenamiento (agua subterránea)	C_S	Expresado en decimales			
57	Insolación	n/N	Expresado en decimales			Valor real (n)/ número posible de horas (N)

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
58	Tensión superficial	σ	N m^{-1}			ISO
59	Temperatura	θ	°C	°F	Fórmula de conversión °C = 5/9 (°F-32)	ISO puede usarse también t
60	Total de sólidos disueltos	m_d	mg l^{-1}	ppm	~ 1	(Para soluciones diluidas)
61	Transmisividad	T	m^2 d^{-1}	pie^2 d^{-1}	0,0929	
62	Presión de vapor	e	Pa	hPa mm Hg pulgada Hg	100,0 133,3 3386,0	
63	Velocidad del agua	v	m s^{-1}	pie s^{-1}	0,305	ISO
64	Volumen	V	m^3	pie^3 acre pie	0,0283 1230,0	ISO
65	Equivalente en agua de la nieve	w_n	mm	pulgada	25,4	

I	II	III	IV	V	VI	VII
	Elemento	*Símbolo*	*Unidades*		*Factor de conversión**	*Observaciones*
			Recomendada	*También en uso*		
66	Número de Weber	W_e	Número adimensional			
67	Perímetro mojado	P_w	m	pie	0,305	
68	Anchura (de una sección transversal o de una cuenca	b	m km	pie milla	0,305 1,609	ISO
69	Velocidad del viento	u	m s^{-1}	km h^{-1} milla h^{-1} k_n (o kt)	0,278 0,447 0,514	
70	Actividad (cantidad de radioactividad)	A	Bq (Becquerel)	Ci (Curie)	3,7 x 10^{10}	OIEA
71	Fluencia de la radiación o fluencia energética	F	Jm^{-2}	erg cm^{-2}	10^3	OIEA
72	Intensidad del flujo de radiación (o del flujo de energía)	I	Jm^{-2} s^{-1}	erg cm^{-2} s^{-1}	10^3	OIEA

TABLA 4.2

Símbolos diversos

	Elemento	*Símbolo*	*Observaciones*
1	Concentración	*c*	ISO
2	Coeficiente (en general)	*C*	ISO
3	Diferencia	Δ	ISO, valores expresados en las mismas unidades
4	Caudal afluente	*I*	
5	Tiempo de respuesta	Δ*t*	unidades variables
6	Carga	*L*	
7	Número de (categoría)	*n*	ISO
8	Caudal efluente	*Q*	
9	Recarga	*r*	(véase infiltración en la Tabla 4.1)
10	Número total	*N*	

TABLA 4.3

Unidades recomendadas indicadas en la Tabla 4.1

	Unidad	*Símbolo*	*Observaciones*
1	Centímetro	*cm*	ISO
2	Día	*d*	ISO
3	Grados Celsius	°C	ISO
4	Gramo	*g*	ISO
5	Hectárea	*ha*	
6	Hectopascal	*hPa*	ISO
7	Hora	*h*	ISO
8	Julio	*J*	ISO
9	Kilogramo	*kg*	ISO
10	Kilómetro	*km*	ISO
11	Nudo	*kn, kt*	
12	Litro	*l*	ISO
13	Metro	*m*	ISO
14	Microsiemens	*μS*	
15	Miligramo	*mg*	ISO
16	Milímetro	*mm*	ISO
17	Minuto	*min*	ISO
18	Newton	*N*	ISO
19	Partes por millón	*ppm*	
20	Pascal	*Pa*	ISO
21	Porcentaje	%	
22	Segundo	*s*	ISO
23	Tonelada (métrica)	*t*	ISO
24	Año	*a*	ISO
25	Becquerel	*Bq*	OIEA

b) las estaciones que funcionan parte de la red básica deberían funcionar siempre durante un período relativamente largo, por ejemplo unos 10 años como mínimo, para obtener información satisfactoria sobre los valores medios de los parámetros observados y sobre sus variaciones temporales;

c) además de las estaciones que forman parte de la red básica, se podrían establecer estaciones hidrológicas para fines especiales, destinadas a funcionar únicamente para investigaciones especiales durante un período limitado. El programa de observación de estas estaciones puede contener muchos elementos. Para garantizar un funcionamiento continuo y seguro es fundamental proceder a una inspección regular y frecuente de todas las estaciones;

d) para evitar malentendidos, las estaciones deben ser identificadas por su nombre y coordenadas geográficas y, cuando proceda, por el nombre de la cuenca del río principal y el nombre del río, el lago o el embalse donde está ubicada la estación. Es indispensable disponer de un directorio exacto y actualizado de las características de las estaciones y de los cambios que ocurran durante el período de funcionamiento;

e) convendría mantener cierta uniformidad en las horas de observación entre las estaciones de una cuenca, teniendo en cuenta los intervalos más adecuados para los elementos que se han de observar. En condiciones excepcionales, por ejemplo en caso de crecidas, se deben realizar mediciones más frecuentes de los elementos adecuados y transmitir lo antes posible los datos obtenidos;

j) para los intercambios internacionales es recomendable utilizar las siguientes unidades de tiempo: el año del calendario gregoriano, los meses de dicho calendario y el día solar medio, de medianoche a medianoche, de acuerdo al huso horario. Sin embargo, en algunos casos, es preferible usar otros períodos que se aproximen más a las fases de los ciclos hidrológicos;

g) para facilitar la interpretación de los fenómenos observados, convendría presentar los datos en forma de valores estadísticos, como promedios, valores máximos y mínimos, desviaciones típicas, distribución de frecuencias (tablas o curvas), etc. Las frecuencias calculadas a partir de la recopilación de datos para períodos relativamente cortos se deben comparar con frecuencias períodos largos (30 años o más). De esta manera, se puede comparar el carácter de un período dado con las condiciones medias de un largo período. Alguno de los datos obtenidos se publicarán en los anuarios hidrológicos. Para cada estación, un resumen estadístico aclarará el significado de los datos del año en cuestión. Un anuario debe contener información completa sobre todas las estaciones: nombre, coordenadas, altitud, área de drenaje, fenómenos observados, horas de observación, período que abarca el registro, etc. A este respecto, conviene que se tengan en cuenta los modelos de tablas que figuran en el capítulo 25 de esta *Guía;*

h) para las actividades internacionales, es conveniente emplear los idiomas español, francés, inglés o ruso y utilizar únicamente símbolos, letras, abreviaturas y unidades internacionalmente reconocidos;

i) los datos hidrológicos observados y procesados permitirán comprender bien las condiciones hidrológicas de un área determinada. Servirán para mejorar o establecer un programa de pronósticos con fines hidrológicos, cuando se necesite dicho programa. Un programa de esta clase debe incluir pronósticos de niveles de agua, caudales, condiciones de hielo, inundaciones y mares de tempestad.

4.3 Exactitud de las mediciones hidrológicas

4.3.1 *Principios* básicos

En teoría, los valores reales de los elementos hidrológicos no se pueden determinar por medición porque los errores de medición no se pueden eliminar completamente. La incertidumbre en la medición tiene un carácter probabilístico que se puede definir como el intervalo donde se espera que el valor real permanecerá con una cierta probabilidad o nivel de confianza. La anchura del intervalo de confianza se denomina también margen de error. Si las mediciones son independientes unas de otras, se puede estimar la incertidumbre en los resultados de las mediciones tomando unas 20 a 25 observaciones y calculando el valor de la desviación típica, y luego determinando el nivel de confianza de los resultados. En general, este procedimiento no puede aplicarse en mediciones hidrométricas, debido a los cambios en el valor a medir durante el período de medición. Por ejemplo, es evidente que, sobre el terreno, no se pueden realizar mediciones consecutivas de caudal con un molinete a nivel constante. En consecuencia, se tiene que hacer una estimación de la incertidumbre, examinando las diferentes fuentes de error en la medición.

Otro problema que se plantea en la aplicación de datos estadísticos a los datos hidrológicos se debe al supuesto de que las observaciones son variables aleatorias independientes de una distribución estadística fija. Esta condición raras veces se cumple en las mediciones hidrológicas. El caudal de un río, por naturaleza, no es aleatorio, depende de valores previos. Generalmente se admite que no es muy importante la manera como se produce el apartamiento entre los datos hidrológicos y los conceptos teóricos de errores. Sin embargo, cabe

insistir en que ningún análisis estadístico puede reemplazar las observaciones correctas, en particular porque con estos análisis no se pueden eliminar los errores sistemáticos. Sólo errores aleatorios pueden caracterizarse por medios estadísticos.

Esta sección contiene definiciones de términos básicos relativos a la exactitud de las mediciones hidrológicas. Se indican los métodos para realizar estimaciones de incertidumbre y se dan los valores numéricos de la exactitud, que se requieren para los parámetros hidrológicos más importantes. Se incluyen también, referencias a las recomendaciones existentes, contenidas en el *Reglamento Técnico* de la OMM [31 y en otras publicaciones.

4.3.2 ***Definiciones de los* términos relacionados con la exactitud**

Las definiciones de los términos relacionados con la exactitud, que figuran a continuación, tienen en cuenta las contenidas en el Volumen III (Hidrología), del *Reglamento Técnico* de la OMM [3], y en la *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos* de la OMM [5]:

Exactitud. nivel de aproximación entre una medición y el valor real. Esto supone que se han aplicado todas las correcciones conocidas.

Intervalo de confianza: intervalo que incluye el valor real con una probabilidad determinada y que es función de las estadísticas de la muestra (figuras 4.1 y 4.2). *Nivel de confianza:* probabilidad de que el intervalo de confianza incluya el valor verdadero (figuras 4.1 y 4.2).

Corrección: valor que se debe agregar al resultado de una medición para tener en cuenta cualquier error sistemático conocido y, por lo tanto, obtener la mejor aproximación al valor verdadero.

Error.- diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la cantidad medida. NOTA: este término designa también la diferencia entre el resultado de una medición y la mejor aproximación al valor verdadero (en vez del propio valor verdadero). La mejor aproximación puede ser la media de varias o muchas mediciones.

Valor probable: la mejor aproximación al valor verdadero; puede ser la media de varias mediciones.

Histéresis (del instrumento): propiedad de un instrumento por la cual da mediciones diferentes del mismo valor real, de acuerdo a si ese valor se alcanzó por un cambio creciente continuo o por un cambio decreciente continuo de la variable. *Medición:* acción que tiene por objeto asignar un número como valor de una magnitud física en las unidades establecidas. (NOTA: el resultado de una medición es completo si incluye una estimación (necesariamente en términos estadísticos) de la magnitud probable de la incertidumbre).

Distribución normal: distribución continua, definida matemáticamente, simétrica, en forma de campana, que tradicionalmente se supone que representa los errores aleatorios.

Precisión: es la proximidad de acuerdo entre mediciones independientes de una sola magnitud obtenidas por la aplicación varias veces de un procedimiento de medición establecido, en condiciones definidas. (NOTA: a) la exactitud se relaciona en la proximidad al valor verdadero, la precisión se refiere únicamente a la proximidad que existe entre varias mediciones; b) la precisión de la observación o de la lectura, es la unidad más pequeña de división de una escala de medida en la cual es posible hacer la lectura directamente o por estimación).

Error aleatorio: parte del error total que varía de manera imprevisible en magnitud y en signo, cuando se hacen mediciones de una variable determinada en las mismas condiciones.

Rango: intervalo entre los valores mínimos y máximos de la magnitud que se ha de medir, para la que se han construido, ajustado o instalado los instrumentos. (NOTA: puede expresarse como la relación entre los valores máximos y mínimos medidos).

Medición de referencia: medición en la que se han utilizado los conocimientos científicos más recientes y las técnicas más avanzadas. El resultado de la medición de referencia se usa para obtener la mejor aproximación del valor verdadero.

Repetibilidad.- proximidad del acuerdo, en presencia de errores aleatorios, entre las mediciones de una misma magnitud, obtenidas en condiciones iguales, por ejemplo: el mismo observador, el mismo instrumento, en el

mismo emplazamiento y a intervalos de tiempo suficientemente cortos para que las diferencias reales sean insignificantes.

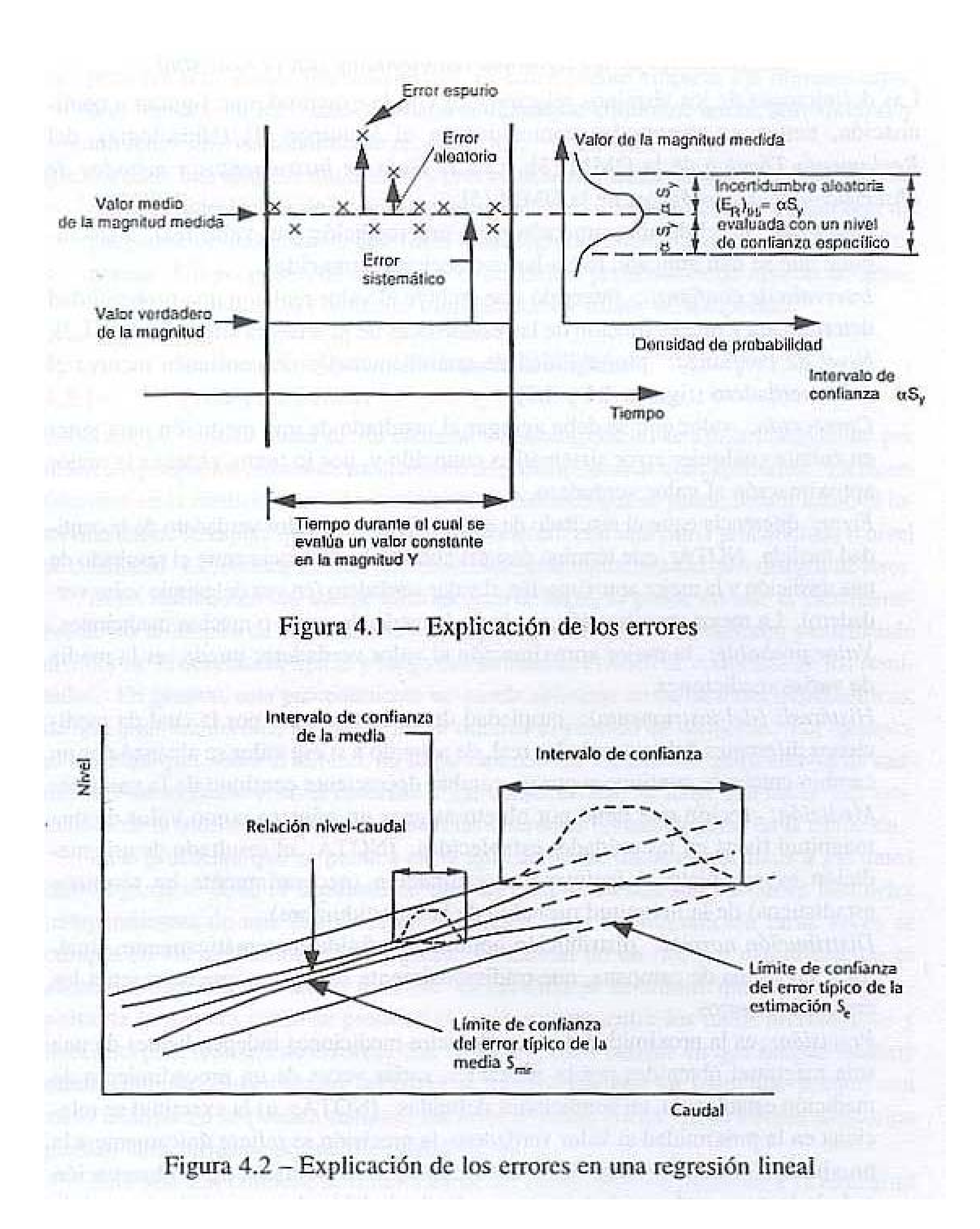


Figura 4.1 — Explicación de los errores

Figura 4.2 – Explicación de los errores en una regresión lineal

Reproducibilidad.- proximidad del acuerdo entre mediciones del mismo valor de una magnitud obtenida en diferentes condiciones, por ejemplo: diferentes observadores, instrumentos, emplazamientos y a intervalos de tiempo suficientemente largos como para que las diferencias erróneas sean insignificantes.

Resolución: cambio más pequeño de una variable física que puede causar una variación en la respuesta de un sistema de mediciones.

Sensibilidad.- relación entre el cambio de la respuesta y el correspondiente cambio del estímulo, o valor del estímulo requerido para producir una respuesta que excede en una cantidad determinada, la respuesta, ya presente, debido a otras causas.

Valor falso: valor del cual se está seguro que es un error, por ejemplo debido a errores humanos o al mal funcionamiento de los instrumentos (figura 4. l).

Desviación típica (Sy): raíz cuadrada positiva de la suma de los cuadrados de las desviaciones de la media aritmética, dividido entre (n-1); está dada por la expresión:

$$S_y = \left[\frac{\sum_{1}^{n} (yi - \bar{y})^2}{n-1} \right]^{1/2} \qquad (4.1)$$

Donde *y* es la media aritmética de la muestra de n mediciones independientes de la variable y; (n-1) indica la pérdida de un grado de libertad.

Error típico de estimación (Se): medición de la variación o dispersión de las observaciones con respecto a una regresión lineal. Es numéricamente similar a la desviación típica, salvo que la relación de regresión lineal sustituye a la media aritmética y (n-1) es sustituido (n-m):

$$S_e = \left[\frac{\sum (d)^2}{n-m} \right]^{1/2} \qquad (4.2)$$

Donde d es la desviación de una observación con respecto al valor de regresión calculado, m el número de constantes en la ecuación de regresión, y (n-m) representa el grado de libertad en la derivación de la ecuación.

Error sistemático: parte del error que:

a) permanece constante durante un número de mediciones del mismo valor de una magnitud determinada; o
b) varía según una ley definida cuando cambian las condiciones (figura4.1).
c) *Tolerancia.-* exactitud permitida en la medición de una variable dada.

Límite de tolerancia: valor del límite inferior o superior determinado para una característica cuantitativa.

Valor verdadero: valor que caracteriza una magnitud en las condiciones que existen en el momento en que se observa dicha magnitud. Es un valor ideal que sólo podría determinarse si todas las causas de error fueran eliminadas.

Incertidumbre: intervalo dentro del cual cabe esperar que se sitúe el valor verdadero de una magnitud con una probabilidad establecida (figura 4. l) (NOTA: el valor numérico de la incertidumbre es el producto de la desviación típica real de los errores y de un parámetro numérico cuyo valor depende del nivel de confianza:

$$e = \pm \ \alpha\sigma_y \approx \pm as_y \qquad (4.3)$$

La desviación típica, *Sy,* calculada a partir de n observaciones, se aproxima a la desviación típica real, αy, como n se aproxima al infinito. En el caso de una distribución normal de errores, los parámetros numéricos son:

Nivel de confianza	α
0,50	0,674
0,60	0,842
0,66	0,954
0,80	1,282
0,90	1,645
0,95	1,960
0,98	2,326
0,99	2,576
0,999	3,291

4.3.3 *Tipos de error*

Los errores espurios deben ser eliminados al descartar los valores de las mediciones correspondientes. Estos errores se pueden identificar por una prueba estadística de dato anómalo, como la descrita en el documento ISO 5168 [7] en el que figuran criterios de rechazo.

Los errores sistemáticos provienen principalmente de los instrumentos y no se pueden reducir aumentando el número de mediciones, si los instrumentos y las condiciones de medición permanecen invariables. Si el error sistemático tiene un valor conocido, este valor se debe sumar o restar del resultado de la medición y el error debido a esta fuente se debe considerar como nulo. El error sistemático debe ser eliminado mediante correcciones, ajustes apropiados o cambiando el instrumento, y/o cambiando las condiciones del caudal, por ejemplo, la longitud del tramo recto del canal de aproximación a una estación de aforo. Con frecuencia estos errores se deben a condiciones de medición difíciles, como caudales no estacionarios, río de meandro y la mala localización de las estaciones.

Los errores aleatorios no se pueden eliminar, pero se pueden reducir sus efectos mediante la repetición de las mediciones de los elementos. La incertidumbre en la media aritmética calculada a partir de n medidas independientes es la raíz cuadrada de n veces más pequeña que la incertidumbre de una sola medición. La distribución de los errores aleatorios se puede considerar como normal (gaussiana). En algunos casos, la distribución normal puede o debería ser remplazada por otras distribuciones estadísticas.

4.3.4 *Fuentes de errores*

Cada instrumento y método de medición tiene sus propias fuentes de error, por lo tanto, sería difícil dar una lista exhaustiva de todas las fuentes de errores posibles. Las fuentes de error específicas generalmente figuran en las descripciones del diseño de los instrumentos y en el modo de empleo, como aparecen en las normas de la ISO, y en el *Manual on Stream Gaugin* de la OMM [81. Algunas de las fuentes típicas de error son:

a) error del punto de referencia o del cero que proviene de la determinación incorrecta del punto de referencia de un instrumento, por ejemplo: el nivel cero de la escala limnimétrica, la diferencia entre el cero de la escala limnimétrica y el nivel de la cresta de un vertedero;

b) error de lectura que resulta de la lectura incorrecta de lo indicado por el instrumento de medición, por ejemplo, a causa de la mala visibilidad, el oleaje o el hielo en la escala limnimétrica;

c) error de interpelación causado por la evaluación inexacta de la posición del índice con respecto a las dos marcas consecutivas de la escala entre las cuales está situado el índice;

d) error de observación, similar al error de lectura, pero se atribuye al observador;

e) histéresis (véase la definición del párrafo 4.3.2);

f) error de no linealidad, parte del error por el cual un cambio de indicación o de respuesta no es proporcional al cambio correspondiente del valor de la magnitud medida en un rango determinado;

g) error de insensibilidad, se produce cuando el instrumento no puede detectar un cambio dado en el elemento medido;

h) error de desviación, se debe a las características del instrumento en el que, con el tiempo y en condiciones de uso particular, cambian las propiedades de medición, por ejemplo: la desviación en la mecánica de la relojería con el tiempo o debido a la temperatura;

i) error de inestabilidad, resulta de la incapacidad de un instrumento para mantener constantes ciertas propiedades meteorológicas específicas;

j) error fuera de rango causado por el uso de un instrumento más allá del alcance de medición efectiva, inferior al mínimo o superior al máximo valor para el que se ha construido, ajustado o instalado el instrumento, por ejemplo: una altura inesperada del nivel de agua;

k) error de exactitud causado por el uso inadecuado de un instrumento, cuando el error mínimo es mayor que la tolerancia para la medición.

4.3.5 *Errores de medición secundarios*

Las observaciones hidrológicas se calculan frecuentemente a partir de varios componentes medidos, por ejemplo, el caudal al nivel de las estructuras de medición se calcula como una función del coeficiente de caudal, de las dimensiones características, y de la carga. Para estimar la incertidumbre resultante, se puede aplicar la teoría de transferencia (propagación) del error de Gauss.

La incertidumbre resultante con frecuencia se remite a la incertidumbre total, que se puede calcular a partir de las incertidumbres de los componentes individuales, si los errores de los componentes individuales se consideran estadísticamente independientes.

Si una magnitud, Q, es función de varias magnitudes medidas, *x, y* y z, el error resultante, e*Q*, *de Q* debido a los errores, *ex, ey y ez,* de *x, y* y z, respectivamente, deben ser evaluados mediante la ecuación de transferencia (propagación) simplificada:

$$(e_Q)^2 = \left(\frac{\partial_Q}{\partial x} e_x\right)^2 + \left(\frac{\partial_Q}{\partial y} e_y\right)^2 + \left(\frac{\partial_Q}{\partial z} e_z\right)^2 \quad (4.4)$$

Donde $\partial_Q/\partial x$, $\partial_Q/\partial y$ y $\partial_Q/\partial z$ son las derivadas parciales de la función que expresa con claridad la relación entre la variable dependiente y las variables independientes.

En las mediciones hidrológicas, es muy raro que una medición pueda repetirse bajo las mismas condiciones de campo. La desviación típica debería, por lo tanto, determinarse mediante el uso de datos de variables no estables (como en el caso de la curva de caudales).

El error típico de estimación:

$$s_e = \left(\frac{\sum d^2}{n-2}\right)^{1/2} \quad (4.5)$$

del promedio de las observaciones es muy importante para la caracterización de la relación altura-caudal, que requiere un tratamiento especial porque esta relación no es lineal, pero aproximadamente logarítmica. Es una estimación de la exactitud de la relación media calculada en una regresión y, por tanto, representa el ámbito en el que debe estar ubicada la media real (figura 4.2).

$$s_{mr} = \frac{s_e}{\sqrt{n}} \qquad (4.6)$$

Para una relación no lineal de dos variables, la desviación típica relativa es más característica y se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$s_y\,\% = \left[\Sigma \left(\frac{\frac{y_m - y_c}{y_c}}{n - 1} \right)^2 \right]^{1/2} \qquad (4.7)$$

Donde y. es el valor medido y *yc*, el valor calculado a partir de la ecuación de regresión (o leído en un gráfico).

4.3.6 *Caracterización de los instrumentos y métodos de observación*

La exactitud de un instrumento de medición se puede caracterizar por una incertidumbre a un valor dado, correspondiente al valor medible máximo o mínimo. La exactitud de un instrumento sin ese valor de referencia puede mal entenderse o mal interpretarse. En muchos casos, la exactitud con que se caracteriza un instrumento no es más que un componente de la exactitud global de la medición.

Para la caracterización de la incertidumbre se usa un nivel de confianza al 95%, es decir que, en el cinco por ciento de los casos, el error podrá estar fuera de¡ intervalo de confianza. Según el *Reglamento Técnico* de la OMM [3], las incertidumbres de las mediciones se deben presentar en una de las siguientes formas:

a) incertidumbres expresadas en términos absolutos:
valor medido de los elementos hidrológicos,
por ejemplo: caudal

Q = ...

Incertidumbre aleatoria

$(e,)_{95}$ =......

b) incertidumbres expresadas en términos porcentuales:
Valor medido de los elementos hidrológicos,

Q = ...

Porcentaje de incertidumbre

$(e,)_{95}$ =.....

En la práctica, las incertidumbres de las mediciones son dadas en forma de relación (o porcentaje) del valor medido *Qm*. Por ejemplo, en el caso de $(er)_{95} = 10\%$, $Qm \pm 0{,}10$ Qm, contendrá el valor real de *Q* en 95% de los casos. En este caso, la incertidumbre se formula suponiendo unas condiciones medias de medición.

4.3.7 ***Exactitud recomendada en las mediciones hidrológicas***

La exactitud recomendada depende sobre todo de¡ uso previsto de los datos medidos (objetivo de la medición), de los instrumentos potencialmente disponibles, y de los recursos financieros disponibles. Por lo tanto, no puede ser un valor constante, sino un rango flexible. La tabla 4.4 contiene los niveles de exactitud recomendados, como una guía general para los instrumentos y métodos de observación. En muchos países, las normas nacionales regulan las exactitudes requeridas.

4.4 Claves Hidrológicas

4.4.1 *Generalidades*

Todos los sistemas de transmisión de datos utilizan métodos de codificación cuyo objetivo es garantizar una transmisión rápida y fiable de la información. En los sistemas completamente automatizados, la información debe ser codificada antes de ser procesada. Por estas razones, las claves están compuestas de formatos estándar que permiten transmitir la información de manera compatible con el procesamiento ulterior. Este procesamiento, en general, es precedido de un control de calidad (sección 22.1).

La estructura de las claves internacionales está reglamentada por acuerdos que resultan de un esfuerzo colectivo. Durante mucho tiempo, la OMM ha creado claves para permitir el intercambio de datos meteorológicos.

En hidrología operativa, las necesidades de datos no son a escala mundial y hasta el momento se han introducido numerosas claves en este ámbito. Esto condujo a la Comisión de Hidrología de la OMM a preparar claves hidrológicas internacionales. El objetivo de estas claves es atender los requerimientos generales para normalizar en la medida de lo posible los procedimientos de codificación y recopilación de datos hidrológicos.

Las claves de la OMM relativas a la hidrología son las claves HYDRA e HYFOR. Los datos transmitidos en estas claves normalizadas son conformes a las normas de la OMM. Por lo tanto, estos datos se pueden difundir a través de los canales de telecomunicaciones de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), si se procede.

Estas claves pueden ser muy útiles para grandes cuencas nacionales o internacionales, donde numerosas estaciones están conectadas a un centro de procesamiento de datos. El observador codifica las observaciones generalmente de forma manual y se transmiten a un centro de concentración para su procesamiento.

Más recientemente, se creó la forma universal de la representación binaria de datos meteorológicos (BUFR) para el intercambio eficiente entre computadoras de datos meteorológicos y la clave GRID para los datos elaborados en forma de valores para puntos de cuadrícula.

4.4.2 *Claves*

En el Volumen I *del Manual de Claves* [9] se describen las claves HYDRA e HYFOR. Se invita al lector a que se remita a este *Manual* para usar estas claves que se describen a continuación. La forma de clave FM 67-VI HYDRA - Informe de observación hidrológica proveniente de una estación de observación hidrológica, puede ser usada para transmitir:

a) datos hidrológicos referentes a la altura del agua;
b) datos hidrológicos referentes al caudal;
c) datos referentes a la precipitación y a la capa de nieve;

TABLA 4.4

Exactitud recomendada (niveles de incertidumbre) expresada al 95 por ciento del intervalo de confianza

Precipitación (cantidad y forma)	3-7%
Intensidad de la lluvia	1 mm/h
Espesor de nieve (puntual)	1 cm debajo de 20 cm o 10% sobre 20 cm
Contenido de agua en la nieve	2,5-10%
Evaporación (puntual)	2-5%, 0,5 mm
Velocidad del viento	0,5 m/s
Nivel del agua	10-20 mm
Altura de ola	10%
Profundidad del agua	0,1 m, 2%
Anchura de la superficie del agua	0,5%
Velocidad de la corriente	2-5%
Caudal	5%
Concentración de sedimento suspendido	10%
Transporte de sedimento suspendido	10%
Transporte de carga de fondo	25%
Temperatura del agua	0,1-0,5°C
Oxígeno disuelto (temperatura del agua superior a 10°C)	3%
Turbidez	5-10%
Color	5%
pH	0,05-0,1 unidad de pH
Conductividad eléctrica	5%
Espesor de hielo	1-2 cm, 5%
Capa de hielo	5% para ≥ 20 kg/m^3
Humedad del suelo	1 kg/m^3 ≥ 20 kg/m^3

NOTA: cuando se recomienda una variedad de niveles de exactitud, el valor inferior se aplica a las mediciones en condiciones relativamente buenas y el valor superior a las mediciones en situaciones difíciles.

d) datos referentes a la temperatura del aire y del agua;

e) datos sobre el estado del hielo en río, lago, o embalse.

La clave FM 68-VI HYFOR - Pronóstico hidrológico, se puede utilizar para transmitir pronósticos de altura, caudal y de hielo.

4.4.3 *Identificación de estaciones de observación hidrológica*

Cuando se transmiten datos de una estación, siempre se da el número de identificación de la estación. Como base para un sistema internacional de estaciones de observación hidrológica, la OMM ha preparado una lista de indicadores internacionales para las cuencas en una determinada Región de la OMM, así como indicadores de los países para cada cuenca donde están ubicadas las estaciones de observación hidrológica. El Volumen 11 *del Manual de Claves* [9] contiene dichas listas.

4.4.4 *Claves BUFR y GRIB*

La clave FM 94-IX Ext. BUFR ha sido diseñada para el archivo e intercambio de datos meteorológicos. Se creó para las aplicaciones informáticas y es similar, en concepto, a las técnicas de compresión de datos utilizadas en diversos bancos de datos hidrológicos (capítulo 24). Actualmente se estudia la expansión del código BUFR para incluir el intercambio de datos hidrológicos en esta forma a través de la VMM. Si se trata de grandes volúmenes de datos, convendría más utilizar la clave BUFR que la clave HYDRA.

La clave FM 47-IX Ext. GRID fue diseñada para la transmisión de datos procesados en forma de valores numéricos para puntos de cuadrícula, por ejemplo, los análisis y pronósticos de variables meteorológicas y de otros parámetros geofísicos. Se dispone también de una clave abreviada, GRAF, para la transferencia de datos elaborados en forma de valores reticulares. La clave FM 92-IX Ext. GRIB, es otra versión de la clave GRID que contiene datos en formato binario. Todas estas claves se pueden procesar en computadoras pero también se pueden descodificar manualmente. Como los datos de teledetección y los datos espaciales o distribuidos, así como datos de sistemas de información geográfica se utilizan cada vez más en hidrología operativo, se espera un amplio uso de estas claves y su adopción para los parámetros hidrológicos.

Referencias

1. Organización Internacional de Normalización, 1979: *Units of Measurement,* ISO Standards Handbook 2, Ginebra.
2. Organización Meteorológica Mundial, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu). OMM-N' 188, Ginebra.
3. Organización Meteorológica Mundial, 1988: *Reglamento Técnico.* Volumen HI, Hidrología, OMM-N'49, Ginebra.
4. Organización Meteorológica Mundial, 1988: *Reglamento Técnico.* Volumen I, Generalidades, OMM-N' 49, Ginebra.
5. Organización Meteorológica Mundial, 1983: *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos.* Quinta edición, OMM-N' 8, Ginebra.
6. Organización Meteorológica Mundial, 1983: *Guía de prácticas climatológicas.* Segunda edición, OMM-N' 100, Ginebra.
7. Organización Internacional de Normalización, 1978: *Measurement o Fluid Flow: Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement.* ISO-5168-1978, Ginebra.
8. Organización Meteorológica Mundial, 1980: *Manual on Stream Gauging.* Volúmenes 1 y H, Informe de hidrología operativo, N' 13, OMM-N' 519, Ginebra.
9. Organización Meteorológica Mundial, 1988: *Manual de Claves.* Volúmenes 1 y H, OMM-N- 306, Ginebra.